

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20105

珠海桂山风电场水域渔业资源声学评估与空间分布

王腾¹, 黄洪辉^{1,2}, 张鹏¹, 张书飞¹, 吴风霞¹, 刘庆霞¹, 廖秀丽¹, 谢斌³

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511485;
3. 滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361102

摘要: 2019 年 10 月 24 日至 26 日, 使用便携式 Simrad EY60 科学探鱼仪对珠海桂山岛海上风电场水域的渔业资源进行了声学调查, 研究了该水域的渔业资源组成、数量密度、资源量密度及其空间分布。本次调查共捕获游泳生物和底栖无脊椎动物 72 种, 其中 34 种参与声学评估。扫海面积法估算的鱼类平均数量密度与资源量密度分别为 1.09×10^4 尾/km², 227.48 kg/km²; 声学方法估算的鱼类数量密度与资源量密度分别为 5.97×10^5 尾/km², 15.13 t/km²。风电场水域鱼类聚集性分布明显, 在风电场西北与东南外围水域密度较高, 中间水域的密度较低。鱼类单体目标强度(TS)分布范围为 -68~ -41 dB, 其中 -68~ -58 dB 的单体 TS 占主要部分(79.12%), 对应鱼类的体长范围为 3~8 cm; 随着水深的增加, 单体平均 TS 先减小后增大。本研究是桂山风电场水域渔业资源的首次声学调查, 结果较准确地反映了风电场水域多种鱼类的资源量及其分布信息, 可为科学评价海上风电场建成运营后对渔业资源的长期影响提供基础数据。

关键词: 渔业资源; 声学评估; 时空分布; 桂山风电场; 中国南海

中图分类号: S932

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)12-1496-09

桂山岛水域位于珠江河口外伶仃洋, 是多种类幼鱼幼虾的育肥场, 被称为南海渔业资源的摇篮^[1]; 该水域还是中华白海豚(*Sousa chinensis*)与江豚(*Neophocaena phocaenoides*)的重要栖息地, 设立了珠海中华白海豚国家级自然保护区^[2]。风电是一种清洁可再生能源, 中国近海拥有丰富的风能资源^[3]和广阔平坦的区域, 适合建设海上风电场。珠海桂山海上风电场位于珠江河口的伶仃洋水域, 是中国南海首个建成并投入运营的海上风电场, 安装了 34 台风机, 总装机容量 198 MW, 首期装机容量 120 MW^[4]。海上风电场建设对所在水域的生物资源会产生影响^[5]。因此, 需要使用科学的评估方法来跟踪研究风电场水域生物资源的变化。

传统的渔业资源评估多采用网具捕捞法, 受渔具选择性、捕捞效率及采样覆盖率所限, 其评估误差较大, 且会对渔业资源及栖息环境造成一定的破坏; 近年来, 水下摄像与摄影技术成为渔业资源监测的一种常用方法, 但该方法易受光照、悬浮颗粒等条件的限制, 导致其应用范围有限^[6-7]; 而声学评估方法能获得高分辨率, 大时空尺度的同步观测数据, 评估效率高, 结果也更为准确, 已逐渐成为中国海洋生物资源调查研究的重要手段之一^[8-10]。本研究于 2019 年 10 月对珠海桂山风电场水域的渔业资源进行了声学评估调查和拖网试捕, 通过对声学映像的处理, 结合拖网捕捞结果, 分析了该水域的渔业资源结构、数

收稿日期: 2020-04-16; **修订日期:** 2020-06-23.

基金项目: 广东省促进经济发展专项资金(海洋经济发展用途)项目(GDME-2018B001, GDNRC[2020]019); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0402); 农业农村部财政专项(NFZX2018).

作者简介: 王腾(1989-), 男, 助理研究员, 研究方向为渔业资源声学评估. E-mail: twangshanghao@163.com

通信作者: 黄洪辉, 研究员, 研究方向为渔业资源学. E-mail: huanghh@scsfr.ac.cn

量密度和资源量密度的时空分布特征, 获取了渔业资源随水深的变化关系及鱼类单体目标强度(target strength, TS)的空间分布信息, 研究结果有利于全面了解风电场建设后该水域的鱼类种群状况, 为研究风电场建设对渔业资源的长期影响奠定基础。

1 材料与方法

1.1 采样地点

本次调查所用渔船为“粤东莞 00589”, 船长 25.60 m, 宽 6.40 m, 吃水 2.50 m, 总重 90 t, 功率 158 kW。调查时间为 2019 年 10 月 24—26 日, 调

查区域为 $113^{\circ}41'28''\text{E}\sim113^{\circ}46'25''\text{E}$, $22^{\circ}0'51''\text{N}\sim22^{\circ}10'45''\text{N}$, 调查水域面积约为 100 km^2 , 水深范围 5~18 m, 平均水深 8 m。本次调查只在白天进行, 调查方式为等间距平行断面的走航式(图 1)。

1.2 声音映像采集与处理

本次调查使用便携式 Simrad EY60 科学探鱼仪(70 kHz)采集声学映像(表 1), 动态经纬度位置信息由 GPS (Gamin GPSCSx, 美国)获得。为减少船体振动产生的噪声, 探鱼仪通过导流罩固定于渔船右舷外侧且不与船体接触, 换能器吃水约 1 m。使用国际通用的“标准球”法校正探鱼仪^[11], 走航调查时的平均船速为 6.0 knots。

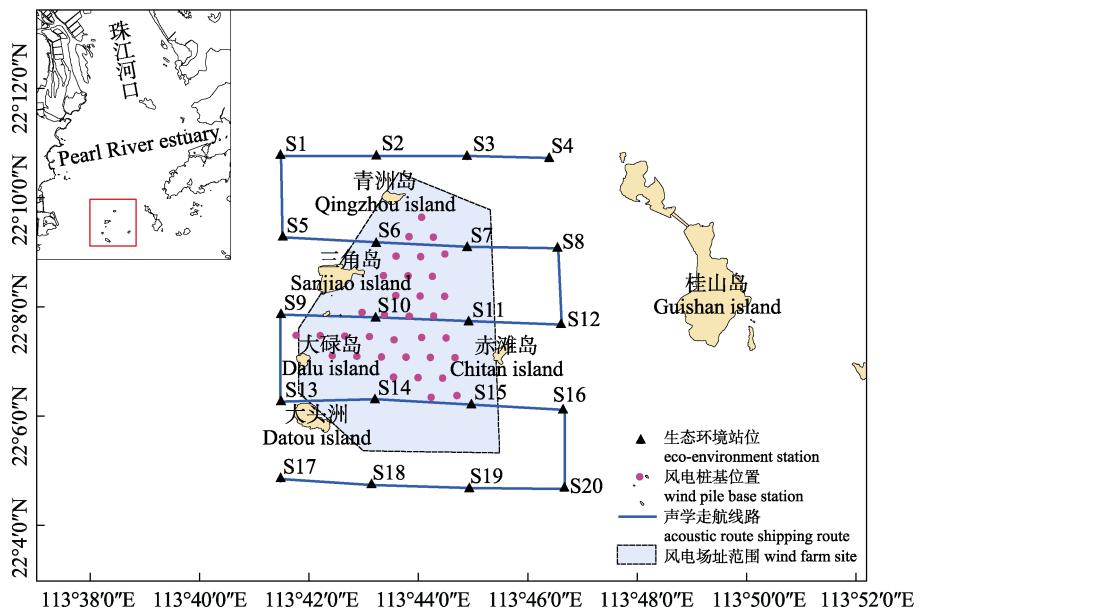


图 1 桂山风电场声学调查区域
Fig. 1 Acoustic survey area in Guishan wind farm area

表 1 EY60 换能器参数设置
Tab. 1 Main settings of EY60 Transducer

参数 parameter	换能器设置 transducer setting
换能器型号 transducer type	ES70-7C
波束频率 beam frequency	70 kHz
脉冲宽度/ms pulse length	0.512
脉冲间隔/s pulse duration	1
功率/W power	800
波束等效立体角/dB equivalent beam angle	-21.00
换能器增益/dB transducer gain	27
吸收系数/(dB/m) absorption coefficient	0.018

使用 Ecoview v6.1 (Echoview Software Pty. Ltd., 澳大利亚)软件处理声学映像, 非走航时段的映像不用于资源量估算。根据换能器的吃水深度与海底深度, 声学映像处理范围为海表面 2 m 以下至海底之上 0.5 m, 基本积分航程单元设为 0.5 n mile, 以分析渔业资源密度的空间结构分布特征。参考现场调查情况, 去除声学映像中的干扰噪声^[12]与海洋背景噪声^[13]。根据郭禹等^[14]的研究, 将后向体积散射强度 S_V (volume backscattering strength, S_V) 的最小阈值设为 -80 dB, 用于屏蔽浮游生物等弱散射体的回波信号。

1.3 生物学样品采集

生物学采样网具为底层虾拖网, 网口网目 40 mm, 网囊网目 10 mm, 扫海宽度 2.50 m。调查期间共拖网 7 次, 覆盖所有断面(S3~S2、S1~S5、S5~S9、S6~S7、S16~S20、S19~S18、S14~S15), 每次拖网约 0.5 h。起网后对所有渔获物进行现场分类和计数, 数量少于 50 尾的物种全部取样, 数量大于 50 尾时, 则根据其体长组成按比例取样。测量并记录渔获物的体长(body length)和体质量(body mass), 体长精确至 1 cm, 体质量精确至 1 g。

1.4 渔业资源密度评估

本研究使用 2 种方法估算鱼类数量密度(number density, 尾/km²)与资源量密度(biomass density, t/km²)。

1.4.1 扫海面积法

根据拖网平均渔获率与扫海面积估算, 公式为:

$$B = Y/A(1-E) \quad (1)$$

式中, B 为资源量密度(kg/km²), Y 为平均渔获率(kg/h), A 为每小时扫海面积(km²/h), E 为逃逸率($E=0.5$)。

1.4.2 参照多种类海洋渔业资源声学评估方法^[15-16]

以渔获物作为积分值分配的主要依据, 研究水域内第 i 物种的数量密度 $\rho_{i,a}$ 和资源量密度 $\rho_{i,b}$ 分别为:

$$\rho_{i,a} = c_i \frac{\text{NASC}}{4\pi\bar{\sigma}_{bs} \cdot 1.852^2} \quad (2)$$

$$\rho_{i,b} = \rho_{i,a} \bar{w}_i 10^{-6} \quad (3)$$

式中, c_i (%)为第 i 物种渔获物数量百分比, NASC 为各积分单元的声学积分值(nautical area scattering coefficient, NASC, m²/nmile²), $\bar{\sigma}_{bs}$ 为所有声学评估鱼类的平均后向散射截面积(backscattering cross-section, m²), \bar{w}_i 为第 i 物种的平均体质量(g)

$$\bar{\sigma}_{bs} = \sum_{i=1}^n c_i 10^{-10} \quad (4)$$

$$\text{TS}_i = 20 \lg L_i + b_{20,i} \quad (5)$$

式中, n 为声学评估的鱼类种类数, TS_i 为第 i 物种的目标强度, L_i 为第 i 物种的平均体长(cm), $b_{20,i}$ 为第 i 物种的目标强度参数, 各声学评估种类的参考值见表 2, 其中竹荚鱼(*Trachurus japonicus*)、黑边天竺鲷(*Apogonichthys ellioti*)及半线天竺鲷(*Apogon semilineatus*)的 b_{20} 参考黄斑蓝子鱼(*Siganus oramin*)^[17], 鲻(*Mugil cephalus* Linnaeus)的 b_{20} 参考多鳞鱚(*Sillago sihama*)^[18], 凹鳍鲬(*Kumococcius detrusus*)的 b_{20} 参考鲬(*Platycephalus indicus*)^[19], 白姑鱼(*Argyrosomus argentatus*)、黄姑鱼(*Nibea albiflora*)、皮氏叫姑鱼(*Johnius belengeri*)、棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)等的 b_{20} 参考大黄鱼

表 2 风电场水域声学评估种类及 b_{20} 值

Tab. 2 Acoustic estimation species of Guishan wind farm area and their b_{20} values

种类 species	拉丁名 Latin name	b_{20}/dB	种类 species	拉丁名 Latin name	b_{20}/dB	种类 species	拉丁名 Latin name	b_{20}/dB
艾氏蛇鳗	<i>Ophichthus evermanni</i>	-76	带鱼	<i>Trichiurus lepturus</i>	-66.1	乌塘鳢	<i>Brionobutis koilomatodon</i>	-76
食蟹豆齿鳗	<i>Pisoodonphis canerivorus</i>	-76	杜氏枪乌贼	<i>Loligo duvaucelii</i>	-78	康氏	<i>Anchoviella commersoni</i>	-72.5
海鳗	<i>Muraenesox cinereus</i>	-76	短棘银鮨	<i>Gerres lucidus</i>	-72.5	小公鱼		
尖嘴前肛鳗	<i>Dysomma melanurum</i>	-76	短吻鮰	<i>Leiognathus brevirostris</i>	-72.5	鳓	<i>Ilisha elongata</i>	-72.5
鲬	<i>Platycephalus indicus</i>	-84.5	多鳞鱚	<i>Sillago sihama</i>	-64.4	六指马鲅	<i>Polynemus sextarius</i>	-80
凹鳍鲬	<i>Kumococcius detrusus</i>	-84.5	风鲚	<i>Coilia mystus</i>	-70	幔鮋	<i>Arius thalassinus</i>	-72.5
白姑鱼	<i>Argyrosomus argentatus</i>	-68	黑边天竺鲷	<i>Apogonichthys ellioti</i>	-72.5	竹荚鱼	<i>Trachurus japonicus</i>	-72.5
黄姑鱼	<i>Nibea albiflora</i>	-68	黄斑鮰	<i>Leiognathus bindus</i>	-72.5	云斑	<i>Epinephelus brunneus</i>	-72.5
皮氏叫姑鱼	<i>Johnius belengeri</i>	-68	黄斑蓝子鱼	<i>Siganus oramin</i>	-74.1	石斑鱼		
棘头梅童鱼	<i>Collichthys lucidus</i>	-68	李氏鰕虎	<i>Callionymus richardsoni</i>	-72.5	鲻	<i>Mugil cephalus</i>	-64.4
半线天竺鲷	<i>Apogon semilineatus</i>	-72.5	黄吻棱鳀	<i>Thrissa vitirostris</i>	-70	线纹幔鮋	<i>Plotosus lineatus</i>	-72.5
						细鳞鰕虎	<i>Therapon jarbua</i>	-72.5
						棕腹刺鲀	<i>Gastrophysus spadiceus</i>	-76

(*Larimichthys crocea*)^[20], 风鲚(*Coilia mystus*)与黄吻棱鳀(*Thrissa vitirostris*)的 b_{20} 参考鳀(*Engraulis japonicus*)^[21], 云斑石斑鱼(*Epinephelus brunneus* Bloch)的 b_{20} 参考青石斑鱼(*Epinephelus awoara*)^[22], 棕腹刺鲀(*Gastrophysus spadiceus*)的 b_{20} 参考丝背细鳞鲀(*Stephanolepis cirrhifer*)^[22], 其他鱼种的 b_{20} 参考南海相关声学调查研究^[23-25]。

调查结果精度用变异系数 (coefficient of variation, CV) 表示, 其计算公式^[26]为:

$$CV = \frac{0.5}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

$$A = \frac{D}{\sqrt{A}} \quad (7)$$

式中, A 为调查覆盖率, D 为声学断面航程(km), A 为调查海域面积(km^2), 本次调查的声学覆盖率为 5.56。

1.5 鱼类现场 TS 测量

对风电场水域的鱼类回波信号进行现场目标强度测量, 检测方法为“分裂波束-方法 2 (split beam-method 2)”, 检测参数详见表 3。

表 3 单体目标检测参数
Tab. 3 Single target detection parameters

参数 parameter	设置 setting
目标强度阈值/dB minimum TS threshold	-70
脉冲宽度确定水平/dB pulse length determination level	6
最小标准脉宽 minimum normalized pulse length	0.75
最大标准脉宽 maximum normalized pulse length	1.5
最大波束补偿/dB max beam compensation	4
最小回波长度 minimum echo length	0.8
最大回波长度 maximum echo length	1.8
最大相位偏差 maximum phase deviation	8

检测完成后再使用“鱼类轨迹追踪(detect fish tracks)”变量筛选单体信号, 原理是通过识别呈现相似运动模式的多个单体信号(一般不少于 3 个), 以显示一条鱼在水中的运动轨迹, 即筛选出属于同一尾鱼的多个单体信号。追踪完成后, 输出每尾鱼的平均 TS 与深度信息。

1.6 资源分布与水深关系

本文以 2 m 为单元将声学映像垂直分层, 统计各水层 NASC 值及百分比, 以分析风电场水域渔业资源垂直分布特征; 此外计算各积分单元的平均资源密度和平均水深, 并对这 2 组数据进行线性回归, 以研究相关性。

2 结果与分析

2.1 评估鱼类种类组成

本次调查共捕获鱼类 38 种, 头足类 3 种, 虾类 12 种, 虾蛄类 6 种, 蟹蟳类为 13 种。为排除海底回波信号干扰, 底栖的鲆鲽类、虾虎鱼类、蛸类、虾蟹类等均不参与声学评估, 即本次调查参与声学评估的鱼类为 34 种。渔获物数量前 5 的鱼类分别为黄斑蓝子鱼(*Siganus oramin*), 鳓(*Mugil cephalus* Linnaeus), 黄斑鲾(*Leiognathus bindus*), 白姑鱼(*Argyrosomus argentatus*), 六指马鲅(*Polynemus sextarius*), 其生物学信息详见表 4。根据扫海面积法, 风电场水域参与声学评估的鱼类平均数量密度为 1.09×10^4 尾/ km^2 , 资源量密度为 227.48 kg/ km^2 。

表 4 渔获物数量前 5 位鱼类生物学组成信息
Tab. 4 Biological composition information of the most abundant 5 species

种类 species	数量/尾 fish number	百分比/% percentage	体长/mm body length		体重/g body weight	
			范围 range	均值 mean	范围 range	均值 mean
黄斑蓝子鱼 <i>Siganus oramin</i>	40	19.61	56-114	85.63	10-27	23.5
鲻 <i>Mugil cephalus</i> Linnaeus	34	16.67	111-143	125	33-70	32.91
黄斑鲾 <i>Leiognathus bindus</i>	27	13.24	56-98	84.33	2-40	14.04
白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i>	17	8.33	14-127	66.5	8-52	10
六指马鲅 <i>Polynemus sextarius</i>	13	6.37	68-92	79.88	12-37	13.85

2.2 声学评估渔业资源密度

声学方法评估的鱼类平均数量密度为 5.97×10^5 尾/ km^2 , 资源量密度为 15.13 t/ km^2 , 渔获物数量前 5 的鱼类资源密度占其总资源量的比例为

53.72% (表 5)。风电场水域鱼类数量密度与资源量密度的空间分布基本一致, 在风电场西北与东南外围水域密度较高, 中间水域的密度较低, 聚集性分布明显(图 2, 图 3)。

表 5 渔获物数量前 5 位鱼类的数量密度与资源密度

Tab. 5 Number and biomass density of the most abundant 5 species

种类 species	数量密度/ ($\times 10^4/\text{km}^2$) number density	资源量密度/ (t/ km^2) biomass density
白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i>	4.95	0.49
黄斑鲻 <i>Leiognathus bindus</i>	7.86	1.10
黄斑蓝子鱼 <i>Siganus oramin</i>	11.85	2.78
鲻 <i>Mugil cephalus</i> Linnaeus	9.89	3.25
六指马鲅 <i>Polynemus sextarius</i>	3.78	0.52

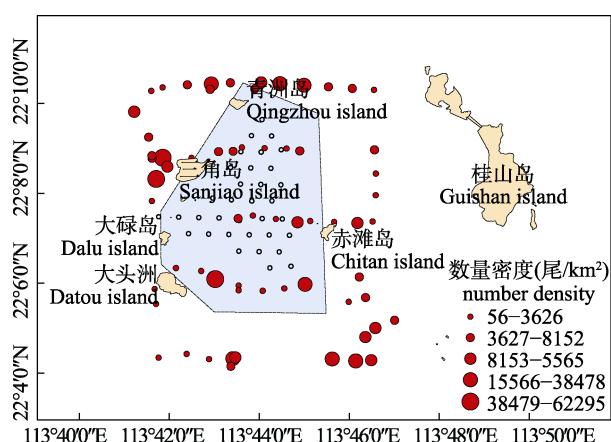


图 2 桂山风电场鱼类数量密度分布

Fig. 2 The distribution of number density in Guishan wind farm area

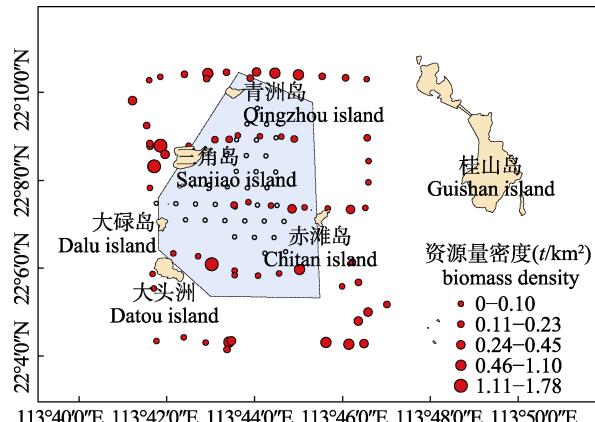


图 3 桂山风电场鱼类资源密度分布

Fig. 3 The distribution of biomass density in Guishan wind farm area

2.3 单体 TS 频率组成与垂直分布

风电场水域的鱼类单体 TS 分布范围为 -68~

-41 dB, 其中 -68~58 dB 的单体 TS 占主要部分 (79.12%), 对应于鱼类的体长范围为 3~8 cm (图 4)。鱼类单体 TS 的时空分布有助于鱼种识别与鱼类行为研究, 调查水域单体鱼类集中分布于 2~12 m 水深; 随着水深的增加, 单体平均 TS 先减小后增大(图 5)。

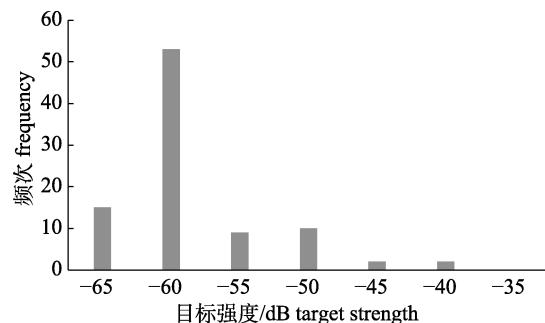


图 4 桂山风电场水域鱼类目标强度频次分布图

Fig. 4 The frequency distribution of fish target strength in Guishan wind farm area

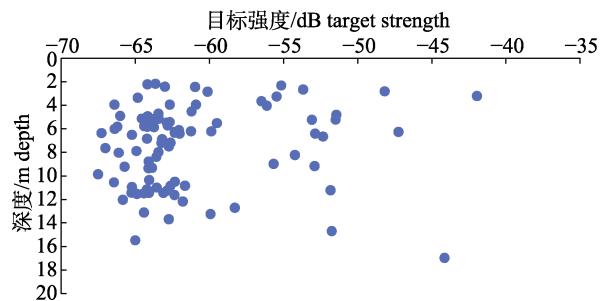


图 5 桂山风电场水域鱼类目标强度垂直空间分布图

Fig. 5 The vertical spatial distribution of fish target strength in Guishan wind farm area

2.4 NASC 分布与水深关系

声学积分值 NASC 是评估渔业资源的重要指标, 为研究调查水域渔业资源的垂直分布特征, 本研究以 2 m 为间隔, 统计各水层的 NASC 及其百分比(图 6)。调查水域的 NASC 主要分布于 2~4 m

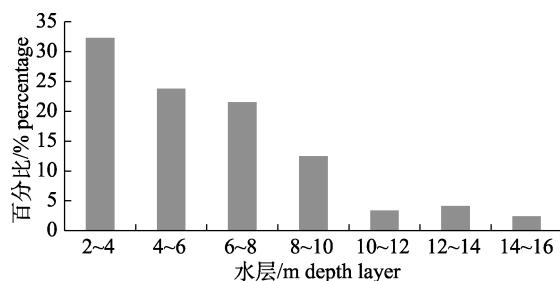


图 6 风电场水域 NASC 垂直分布百分比

Fig. 6 Vertical distribution of NASC in Guishan wind farm area

水层, 约占总体的 32.31%; 4~6 m、6~8 m 水层次之, 且二者差别不大。回归分析表明, NASC 随水深增加而减小, 其决定系数 $R^2=0.9271$ 。

3 讨论

桂山风电场水域是多类型幼鱼幼虾的育肥场, 具有重要的生态意义。在此育肥的海洋鱼类幼鱼生长到一定尺寸后游回大海; 咸淡水鱼类幼鱼的移动范围较小, 其生活史集中在河口水域; 淡水鱼类幼鱼生长到一定尺寸后上溯至淡水区域。本研究是风电场水域渔业资源的首次声学调查, 评估结果可提供准确的渔业资源量与分布信息, 为监测风电场建成后渔业资源的长期变化提供基础数据。

3.1 风电场水域渔业资源密度

声学方法估算的风电场水域渔业资源密度为 15.06 t/km², 而扫海面积法的估算结果为 227.48 kg/km², 2 种评估结果差异较大。扫海面积法是渔业资源评估的传统方法, 采用站位采样的方式, 其覆盖率明显低于声学方法, 加之渔业资源的不均匀分布导致该方法的随机误差较大^[27-28]。本研究扫海面积法及声学方法的评估结果均表明, 风电场水域的渔业资源空间分布差异极大(图 2, 图 3), 将来可增加采样站位数以降低误差。

柘林湾海洋牧场水域^[29]、海南陵水湾^[30]、南澳岛^[31]的声学评估结果表明, 渔业资源密度呈现季节性变化趋势(秋季>夏季>春季), 可能是因为春季较低的水温导致在其他水域越冬的种群尚未洄游至此, 待春夏季繁殖期过后, 由于种群补充与洄游群体的加入, 导致秋季渔业资源密度较高^[2]。本次调查评估了风电场水域秋季的渔业资源量, 将来可增加其他季节的调查以明确其季节变化特征。

调查水域的渔业资源量明显高于其他水域, 可能是因为本水域作为重要的仔稚鱼育肥场, 渔业资源天然丰富。海南陵水湾 2014 年秋季声学调查的鱼类数量密度约为本水域的 2 倍, 资源量密度却为 1/3^[30], 可能是本水域拖网采样的鱼类更重。

3.2 渔业资源空间分布

风电场水域渔业资源聚集分布, 在风电场西北与东南外围水域密度较高, 中间水域的密度较

低(图 2, 图 3), 可能是风电场建设及运营时产生的水下噪声污染驱离了中间水域的鱼类^[32], 还需要将来更多次的调查研究予以确认。鱼类 TS 检测结果表明, 随着水深的增加, 单体平均 TS 先减小后增大(图 5), 即大个体鱼类可能多分布于底层, 导致底拖网采样得到的鱼类体长组成偏大, 对应的后向散射截面积 σ 也偏大, 基于此估算的渔业资源量可能偏小。

调查水域的声学积分值主要分布于 2~8 m 水层, 约占总体的 77.60% (图 6), 表明白天渔业资源主要分布于中上水层, 这与 Kubecka 等^[33]的结论相反(白天鱼类向底层迁移, 夜晚有向表层迁移), 还需要更多次的声学调查予以明确。本研究将后向体积散射强度的最小阈值设为 -80 dB, 用于屏蔽浮游生物等弱散射体的回波信号, 但 NASC 的水层分布表明(图 6), 浮游生物的回波可能未有效去除, 将来可参考曾雷等^[31]的研究, 通过 Ecoview 软件中的阈值响应(threshold response)模块分析 S_V 阈值的变化对 NASC 的影响, 从而更准确的判断 S_V 的可信阈值区间。

3.3 声学评估方法分析

受换能器近场效应与海底探测盲区的影响, 声学映像的积分起止水层设置为海表面 2 m 以下至海底 0.5 m 以上, 即海表面与底栖生物均不参与积分值分配, 其资源量也将无法估算。对声学映像的处理结果表明, 调查水域存在鱼类集群现象, 而集群导致的遮蔽效应可能低估评估结果^[34]。积分值分配也会影响到评估精度, 在大范围的声学调查中, 假定捕捞网具对所有鱼种具有相同的捕捞效率, 根据采样站位的渔获组成与数量信息, 对其前后若干单元的积分值进行分配; 但网具的选择性^[27-28]及鱼类的回避行为^[35-36]都会影响渔获信息的准确性, 进而导致评估结果有误。由于风电场水域范围较小, 本研究以整个调查水域的渔获信息表征各基本积分单元的物种组成, 对声学积分值进行分配, 可降低上述因素对积分值分配的影响。

若调查水域单一鱼种数量占绝大多数, 则可使用目标强度现场检测法进行资源评估。曾雷等^[31]在 2015 年春季调查南澳岛海域时, 发现鹿斑蝠

(*Secutor ruconius*)在渔获数量中所占比重高达 86.87%，使用回波积分法与目标强度现场检测法的评估结果基本一致，推断在渔获优势集中度较高的特定水域，使用目标强度检测法也可有效评估资源密度。本调查水域各鱼种渔获数量相对分散(表 4)，不同鱼种间的平均体长存在一定差异，使用目标强度检测法的误差可能较大，因此使用回波积分法来评估渔业资源密度。

对于多鱼种分布的调查水域，各积分鱼种的目标强度参数 b_{20} 是影响声学评估精度的一个重要因素。本研究表 2 中的参数 b_{20} 均参考相关文献^[17-25]，可能对评估结果造成一定影响。如陈国宝等^[17]测量的 120 kHz 下黄斑蓝子鱼的 b_{20} 为 -74.1 dB，对应的实验鱼叉长为 7.3~19.5 cm；本研究蓝子鱼叉长为 7.6~11.4 cm，位于上述范围内，但本研究的声波频率为 70 kHz，使用 120 kHz 下的 b_{20} 会低估后向散射截面积 σ ，基于此估算的渔业资源量将偏大。

中国在水生生物目标强度方面的研究工作起步较晚且研究物种较少，给多鱼种声学资源评估带来了较大困难。现阶段研究人员多使用现场测量法^[37]、网箱法^[38]、绳系法^[39]及模型法^[40]等测量目标强度，考虑到调查水域现状，将绳系法与模型法结合起来进行相关研究，有助于提高声学评估的精度，以便于更好的掌握风电场水域的渔业资源现状。

参考文献：

- [1] Wang D, Lin Z J. Spatial and temporal variations of fish community structure in the Pearl River Estuary waters[J]. South China Fisheries Science, 2006, 2(4): 37-45. [王迪, 林昭进. 珠江口鱼类群落结构的时空变化[J]. 南方水产, 2006, 2(4): 37-45.]
- [2] Huang J W, Sun D R, Liu Y, et al. Diversity of fish community in *Sousa chinensis* nature reserve of Pearl River Estuary[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(5): 1000-1007. [黄吉万, 孙典荣, 刘岩, 等. 珠江口中华白海豚自然保护区鱼类群落多样性分析[J]. 南方农业学报, 2018, 49(5): 1000-1007.]
- [3] Xiao Y Q, Jia S J. Development status and technology analysis of offshore wind power in China[J]. East China Electric Power, 2010, 38(2): 277-280. [肖运启, 贾淑娟. 我国海上风电发展现状与技术分析[J]. 华东电力, 2010, 38(2): 277-280.]
- [4] Ma Z R, Liu J C, Yuan G K. Design of wind turbine supporting structure in Zhuhai Guishan offshore wind farm[J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 72-75. [马兆荣, 刘晋超, 元国凯, 等. 珠海桂山海上风电场风电机组基础设计[J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 72-75.]
- [5] Bergström L, Kautsky L, Malm T, et al. Effects of offshore wind farms on marine wildlife: A generalized impact assessment[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(3): 034012.
- [6] Tessier A, Pastor J, Francour P, et al. Video transects as a complement to underwater visual census to study reserve effect on fish assemblages[J]. Aquatic Biology, 2013, 18(3): 229-241.
- [7] DeMartini E E, Roberts D. An empirical test of biases in the rapid visual technique for species-time censuses of reef fish assemblages[J]. Marine Biology, 1982, 70(2): 129-134.
- [8] Tan X C, Kang M, Tao J P, et al. Hydroacoustic survey of fish density, spatial distribution, and behavior upstream and downstream of the Changzhou Dam on the Pearl River, China[J]. Fisheries Science, 2011, 77(6): 891-901.
- [9] Chen G B, Zhang J, Yu J, et al. Hydroacoustic scattering characteristics and biomass assessment of the purpleback flying squid [*Sthenoteuthis oualaniensis*, (Lesson, 1830)] from the deepwater area of the South China Sea[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2013, 29(6): 1447-1452.
- [10] Zhang J, Chen Z Z, Chen G B, et al. Hydroacoustic studies on the commercially important squid *Sthenoteuthis oualaniensis* in the South China Sea[J]. Fisheries Research, 2015, 169: 45-51.
- [11] Foote K G, Knudsen H P, Vestnes G, et al. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: A practical guide[J]. ICES Cooperative Research Report, 1987, 144: 1-69.
- [12] Wang X L, Zhao X Y, Tang Y, et al. Removal of the inter-instrument acoustic interference and its application in the study of Antarctic krill swarms[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35 (2): 22-29. [王新良, 赵宪勇, 汤勇, 等. 声学仪器间干扰信号的消除及其在南极磷虾集群研究中的应用[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(2): 22-29.]
- [13] de Robertis A, Higginbottom I. A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise[J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(6): 1282-1291.
- [14] Guo Y, Li C H, Chen G B. Acoustic estimation of fishery resources inside and outside the algae breeding zone of Bai-shawan in Nan'ao[J]. Journal of fisheries of China, 2018, 42(2): 226-235. [郭禹, 李纯厚, 陈国宝. 南澳白沙湾海藻养殖区内外渔业资源声学评估[J]. 水产学报, 2018, 42(2): 226-235.]

- 226-235.]
- [15] Li Y Z, Chen G B, Sun D R, et al. Work programme of acoustic assessment of multi-species fish stock in the South China Sea[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2003, 23(1): 35-40. [李永振, 陈国宝, 孙典荣, 等. 南海区多鱼种声学评估工作程序[J]. 湛江海洋大学学报, 2003, 23(1): 35-40.]
- [16] Zhao X Y, Chen Y Z, Li X S, et al. Acoustic estimation of multi-species marine fishery resources[C]//Proceedings of China Exclusive Economic Zone and Continental Shelf Survey Research. Beijing: China Ocean Press, 2002: 341-353. [赵宪勇, 陈毓桢, 李显森, 等. 多种类海洋渔业资源声学评估技术与方法[C]//我国专属经济区和大陆架勘测研究论文集. 北京: 海洋出版社, 2002: 341-353.]
- [17] Chen G B, Li N N, Chen P M, et al. Target strength measurements of pearl-spotted spinefoot (*Siganus oramin*) in the South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(6): 1293-1299. [陈国宝, 李娜娜, 陈丕茂, 等. 南海黄斑蓝子鱼的目标强度测量研究[J]. 中国水产科学, 2010, 17(6): 1293-1299.]
- [18] Li B, Chen G B, Zeng L, et al. Modeling study on the target strength of *Sillago sihama*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(2): 403-412. [李斌, 陈国宝, 曾雷, 等. 多鳞鱚目标强度的模型法研究[J]. 中国水产科学, 2018, 25(2): 403-412.]
- [19] Ren Y Q, Wang K, Duan X B, et al. In situ hydroacoustic estimates of the target strength and behavior characteristics of *Aristichthys nobilis*[J]. Freshwater Fisheries, 2011, 41(2): 3-9. [任玉芹, 王珂, 段辛斌, 等. 鲢目标强度和行为特征的水声学研究[J]. 淡水渔业, 2011, 41(2): 3-9.]
- [20] Luan Y, Guan C T, Shi X T, et al. The relationship between acoustic backscattering property and weight and body length of big yellow croaker and black rockfish[J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(2): 47-52. [栾洋, 关长涛, 石晓天, 等. 大黄鱼和许氏平鱼由声反射特征与体重和体长关系的研究[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(2): 47-52.]
- [21] Yu H Y, Zhao X Y. Modeling study on the target strength of anchovy (*Engraulis japonicus*)[J]. Applied Acoustics, 2007, 26(5): 267-276. [于海圆, 赵宪勇. 鳀鱼(*Engraulis japonicus*)目标强度的模型法研究[J]. 应用声学, 2007, 26(5): 267-276.]
- [22] Zhang J, Chen P M, Chen G B, et al. Acoustic target strength measurement of banded grouper [*Epinephelus awoara* (Temming & Schlegel, 1842)] and threadsial filefish [*Stephanolepis cirrifer* (Temming & Schlegel, 1850)] in the South China Sea[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2013, 29(6): 1453-1455.
- [23] Chen G B, Li Y Z, Zhao X Y, et al. Acoustic assessment of commercial fish resources in the northern waters of South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(4): 445-451. [陈国宝, 李永振, 赵宪勇, 等. 南海北部海域重要经济鱼类资源声学评估[J]. 中国水产科学, 2005, 12(4): 445-451.]
- [24] Li Y Z, Chen G B, Zhao X Y, et al. Acoustic assessment of non-commercial small-size fish resources in the northern waters of South China Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(2): 206-212. [李永振, 陈国宝, 赵宪勇, 等. 南海北部海域小型非经济鱼类资源声学评估[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2005, 35(2): 206-212.]
- [25] Zhang J, Chen G B, Chen Z Z, et al. Acoustic estimation of fishery resources in southern continental shelf of Nansha area[J]. South China Fisheries Science, 2015, 11(5): 1-10. [张俊, 陈国宝, 陈作志, 等. 南沙南部大陆架海域渔业资源声学评估[J]. 南方水产科学, 2015, 11(5): 1-10.]
- [26] Aglen A. Random errors of acoustic fish abundance estimates in relation to the survey grid density applied[R]. FAO Fisheries Report, 1983, 300: 293-297.
- [27] Erzini K, Gonçalves J M S, Bentes L, et al. Size selectivity of trammel nets in southern European small-scale fisheries[J]. Fisheries Research, 2006, 79(1-2): 183-201.
- [28] Říha M, Jůza T, Prchalová M, et al. The size selectivity of the main body of a sampling pelagic pair trawl in freshwater reservoirs during the night[J]. Fisheries Research, 2012, 127-128: 56-60.
- [29] Zhang J, Chen P M, Fang L C, et al. Background acoustic estimation of fisheries resources in marine ranching area of Zhelin Bay-Nan'ao Island in the South China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(8): 1187-1198. [张俊, 陈丕茂, 房立晨, 等. 南海柘林湾-南澳岛海洋牧场渔业资源本底声学评估[J]. 水产学报, 2015, 39(8): 1187-1198.]
- [30] Li B, Chen G B, Yu J, et al. The acoustic survey of fisheries resources for various seasons in the mouth of Lingshui Bay of Hainan Island[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(4): 544-556. [李斌, 陈国宝, 于杰, 等. 海南陵水湾口海域不同季节鱼类资源声学探查[J]. 水产学报, 2018, 42(4): 544-556.]
- [31] Zeng L, Chen G B, Yu J. Acoustic assessment of fishery resources and spatial distribution in Nan'ao Island area[J]. South China Fisheries Science, 2018, 14(2): 26-35. [曾雷, 陈国宝, 于杰. 南澳岛海域渔业资源声学评估与空间分布[J]. 南方水产科学, 2018, 14(2): 26-35.]
- [32] Rollins K E, Meyerholz D K, Johnson G D, et al. A forensic investigation into the etiology of bat mortality at a wind farm: Barotrauma or traumatic injury?[J]. Veterinary Pathology,

- 2012, 49(2): 362-371.
- [33] Kubecka J, Duncan A N. Diurnal changes of fish behaviour in a lowland river monitored by a dual-beam echosounder[J]. *Fisheries Research*, 1998, 35(1-2): 55-63.
- [34] Toresen R. Absorption of acoustic energy in dense herring schools studied by the attenuation in the bottom echo signal[J]. *Fisheries Research*, 1991, 10(3-4): 317-327.
- [35] Jüza T, Rakowitz G, Draštík V, et al. Avoidance reactions of fish in the trawl mouth opening in a shallow and turbid lake at night[J]. *Fisheries Research*, 2013, 147: 154-160.
- [36] Wheeland L J, Rose G A. Quantifying fish avoidance of small acoustic survey vessels in boreal lakes and reservoirs[J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2015, 24(1): 67-76.
- [37] De Robertis A, Taylor K. In situ target strength measurements of the scyphomedusa *Chrysaora melanaster*[J]. *Fisheries Research*, 2014, 153: 18-23.
- [38] Rodríguez-Sánchez V, Encina-Encina L, Rodríguez-Ruiz A, et al. Horizontal target strength of *Luciobarbus sp.* in ex situ experiments: Testing differences by aspect angle, pulse length and beam position[J]. *Fisheries Research*, 2015, 164: 214-222.
- [39] Chen G B, Li Y Z, Chen P M, et al. Measurement of single-fish target strength in the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30(4): 554-562.
- [40] Kang D, Sadayasu K, Mukai T, et al. Target strength estimation of black porgy *Acanthopagrus schlegeli* using acoustic measurements and a scattering model[J]. *Fisheries Science*, 2004, 70(5): 819-828.

Acoustic survey of fisheries resources and spatial distribution in the Guishan wind farm area

WANG Teng¹, HUANG Honghui^{1,2}, ZHANG Peng¹, ZHANG Shufei¹, WU Fengxia¹, LIU Qingxia¹, LIAO Xiuli¹, XIE Bin³

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300, China;
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511485, China;
3. Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China

Abstract: Based on acoustic and bottom trawl survey data in the Guishan wind farm area in autumn 2019, we analyzed the species composition, species dynamics, and spatial distribution of fisheries resources in that area. A total of 72 species of swimming organisms and benthic invertebrates were caught, of which 34 species were assessed in this survey. The number and biomass estimated by the acoustic method were 5.97×10^5 ind/km² and 15.13 t/km², respectively. Fish aggregation distribution characteristics were obvious in this area, and the density was higher in the northwest and southeast regions. The distribution range of fish single TS was -68--41dB, of which -68- -58dB was dominant (79.12%), corresponding to a fish body length of 3-8 cm. With increasing water depth, the mean fish TS first decreased and then increased. This study was the first acoustic survey of fisheries resources in this area. The assessment results could provide accurate information on the quantity and distribution of various fish species, and provide basic data for monitoring long-term changes in fisheries resources after the wind farm has been completed.

Key words: fisheries resources; acoustic assessment; spatial distribution; Guishan wind farm area; South China Sea

Corresponding author: HUANG Honghui. E-mail: huanghh@scsfri.ac.cn